

Маджар Никита Федорович

магистрант

ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский

технологический университет»

г. Москва

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКА В ВИБРАТОРНЫХ АНТЕННАХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА НАВОДИМЫХ ЭДС

***Аннотация:** исследование распределения тока, безусловно, является одной из важнейших задач при проектировании антенн. От распределения тока зависит то, насколько точной будет математическая модель антенны, и соответственно сходимость результатов моделирования с экспериментальными измерениями.*

***Ключевые слова:** метод наводимых ЭДС, вибраторная антенна, распределение тока, входное сопротивление, взаимное сопротивление.*

Метод наводимых ЭДС разрабатывался для расчета взаимных сопротивлений между вибраторами. На рисунке 1 показана геометрия задачи метода наводимых ЭДС. Также на ней указаны все размеры, которые используются при расчетах. Исследуя, например систему, состоящую из двух вибраторов, полное входное сопротивление одного вибратора определяется как сумма собственного и взаимного сопротивлений:

$$Z_{01} = Z_{11} + \frac{I_2}{I_1} Z_{12} \quad (1)$$

где Z_{11} – собственное входное сопротивление; Z_{12} – взаимное сопротивление между первым и вторым вибраторами.

Полное входное сопротивление второго вибратора Z_{02} находится очевидной заменой индексов.

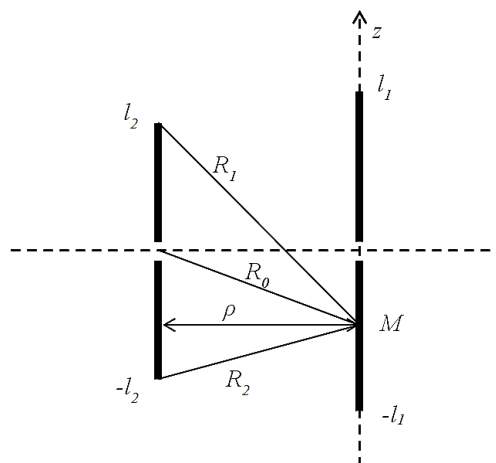


Рис. 1. Пространственное расположение двух вибраторов

Взаимное сопротивление по методу наводимых ЭДС находится согласно следующему выражению:

$$Z_{12} = -\frac{1}{I_{01}^* I_{02}} \int_{-l_1}^{l_1} E_{z12}(z) \cdot I_{z1}^*(z) dz \quad (2)$$

где

$$I_{z1}(z) = I_{01} \frac{\sin k(l_1 - |z|)}{\sin kl_1} \quad (3)$$

– нормированное синусоидальное распределение тока с узлами на концах вибраторов;

$$E_{z12}(z) = \frac{-jWI_0}{4\pi \sin(kl_2)} \left\{ \frac{\exp(-jkR_1)}{R_1} + \frac{\exp(-jkR_2)}{R_2} - 2 \cos(kl_2) \frac{\exp(-jkR_0)}{R_0} \right\} \quad (4)$$

– тангенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля

$W = 120\pi$ – волновое сопротивление среды;

$R_1 = \sqrt{\rho^2 + (z-l)^2}$ – расстояние от верхнего конца вибратора до точки интегрирования M ;

$R_2 = \sqrt{\rho^2 + (z+l)^2}$ – расстояние от нижнего конца вибратора до точки M ;

$R_0 = \sqrt{\rho^2 + z^2}$ – расстояние от центра вибратора до точки M .

Выражение (3) хорошо описывает тонкие вибраторы, для толстых вибраторов возникает задача поиска распределений токов по их поверхности. Для этой цели можно воспользоваться методом наводимых ЭДС.

Входное сопротивление симметричного полуволнового вибратора, найденное классическим методом наводимых ЭДС, составляет $Z \approx 72 + 42i$ (Ом). Возьмем такой же вибратор и поделим его на более мелкие «независимые» вибраторы и зададимся кусочно-синусоидальными распределениями тока в них (рисунок 2).

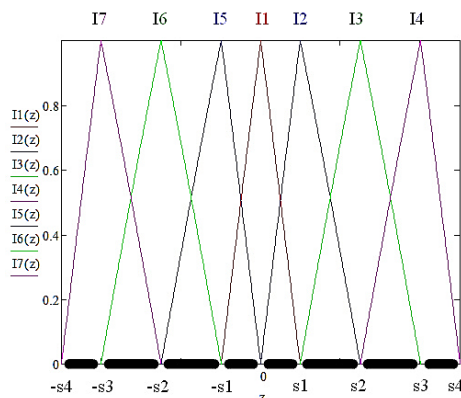


Рис. 2. Представление тока в виде кусочно-синусоидальных функций

В этом случае данную систему нужно рассматривать как систему из множества вибраторов (как симметричных, так и несимметричных) с перекрывающимися плечами. Токи в вибраторах задаются следующим образом:

$$I_1(z) = \frac{\sin(k(s_1 - |z|))}{\sin(k \cdot s_1)} \text{ при } -s_1 \leq z \leq s_1 \quad (5)$$

для симметричного вибратора;

$$I_2(z) = \begin{cases} \frac{\sin(k(s_1 - |z - s_1|))}{\sin(k \cdot s_1)} & \text{при } 0 < z \leq s_1 \\ \frac{\sin\left(k\left(\frac{l_2}{2} - |z - s_1|\right)\right)}{\sin\left(k \cdot \frac{l_2}{2}\right)} & \text{при } s_1 < z \leq s_2 \end{cases} \quad (6)$$

для несимметричного вибратора.

Остальные токи расписываются аналогичным образом с учетом длины вибратора, смещения и нормировки.

Подставляя токи $I_1(z)$ - $I_7(z)$ и $E_z(z)$ в котором ρ – толщина вибратора в выражение (2), получаем матрицу собственных и взаимных сопротивлений:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} & Z_{17} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} & Z_{27} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} & Z_{37} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} & Z_{47} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} & Z_{57} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} & Z_{67} \\ Z_{71} & Z_{72} & Z_{73} & Z_{74} & Z_{75} & Z_{76} & Z_{77} \end{bmatrix} \quad (7)$$

В матрице Z красным жирным шрифтом выделены те взаимные сопротивления, которые нужно найти, остальные будут им равны. Например: $Z_{12} = Z_{21} = Z_{15} = Z_{51}$, $Z_{33} = Z_{66}$ и т. д.

Т.к. вибратор симметричный, распределение токов по плечам вибратора также будет симметричное, поэтому соответствующие комплексные амплитуды токов будут равны $I_5 = I_2$, $I_6 = I_3$, $I_7 = I_4$.

Решив систему уравнений, найдем комплексные амплитуды токов I_1 , I_2 , I_3 , I_4 . Результаты расчетов представлены на рисунке 3 и 4.

Given

$U := \sin(k \cdot I1)$

$U = I1 \cdot Z11 + 2 \cdot I2 \cdot Z12 + 2 \cdot I3 \cdot Z13 + 2 \cdot I4 \cdot Z14$

$0 = I1 \cdot Z12 + I2 \cdot (Z22 + Z25) + I3 \cdot (Z23 + Z26) + I4 \cdot (Z24 + Z27)$

$0 = I1 \cdot Z13 + I2 \cdot (Z23 + Z35) + I3 \cdot (Z33 + Z36) + I4 \cdot (Z34 + Z37)$

$0 = I1 \cdot Z14 + I2 \cdot (Z24 + Z45) + I3 \cdot (Z34 + Z46) + I4 \cdot (Z44 + Z47)$

Синусоидальное напряжение
Напряжение приложено
только к первому вибратору

Остальные вибраторы
являются пассивными
(напряжения на входах
отсутствуют)

$I := \text{Find}(I1, I2, I3, I4) \rightarrow \begin{pmatrix} 0.0029564013457230591321 - 0.0016104568858867973747i \\ 0.0028225565844678508097 - 0.0016639173675413823909i \\ 0.002135599024740935682 - 0.0013461376220219501823i \\ 0.00098482726956128720029 - 0.00065087621088706307944i \end{pmatrix}$

Рис. 3. Интерфейс программы с расчетом системы уравнений

$$Z_{01} := \frac{I_{1,1} \cdot Z_{11} + 2 \cdot I_{2,1} \cdot Z_{12} + 2 \cdot I_{3,1} \cdot Z_{13} + 2 \cdot I_{4,1} \cdot Z_{14}}{I_{1,1}} = 79.822 + 43.482i$$

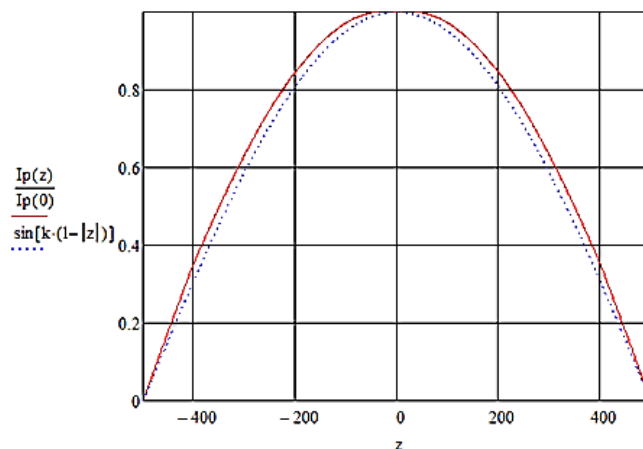


Рис. 4. Интерфейс программы с результатами расчетов

Заключение: результаты расчетов, представленные на рисунке 4, показывают, что входное сопротивление, рассчитанное при помощи кусочно-синусоидальных функций $Z=79.82+43.48i$ близко к входному сопротивлению, полученному стандартной моделью метода наводимых ЭДС $Z=72+42i$. Распределение тока (красная сплошная) также близко к синусоидальному распределению (синяя штрихованная) и с увеличением толщины вибратора увеличивается расхождение от идеального синуса.

Список литературы

1. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны / Г.З. Айзенберг [и др.]; под ред. Г.З. Айзенберга – 2-е, перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1985. – 536 с.
2. Лавров Г.А. Взаимное влияние линейных вибраторных антенн. – М.: Связь, 1975. – 128 с.
3. Марков Г.Т. Антенны. Учебник для радиотехнических специальностей вузов / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: «Энергия», 1975. – 528 с.